

М.А. ТКАЧУК, д.т.н., проф., зав. каф. ТММ і САПР НТУ "ХПІ", м. Харків

О.В. УСТИНЕНКО, к.т.н., доц., с.н.с. каф. ТММ і САПР НТУ "ХПІ"

Р.В. ПРОТАСОВ, асп. каф. ТММ і САПР НТУ "ХПІ"

М.М. ТКАЧУК, м.н.с. каф. КГМ ім. О.О. Морозова НТУ "ХПІ"

ДО 125-РІЧЧЯ НТУ "ХПІ".

РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ СИНТЕЗУ ГЕОМЕТРІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ НОВИХ ЗУБЧАСТИХ ЗАЧЕПЛЕНЬ В УНІВЕРСИТЕТІ

В работе описаны исследования в области синтеза геометрии и анализа напряженно-деформированного состояния новых зубчатых передач. Показаны направления дальнейших исследований.

In article researches in the field of geometry synthesis and the analysis of new gears stress-strain state are described. Directions of the further researches are shown.

Вступ. На даний час актуальною і важливою є проблема синтезу геометрії та підвищення навантажувальної здатності зубчастих передач. Вона має декілька шляхів розв'язання. Зокрема, це шлях впровадження якісно нових зачеплень [1-11], а, крім того, значні резерви приховані у традиційних методах розрахунків зубчастих передач, що потребують нових підходів [12-17]. Поєднання вказаних напрямків для підвищення навантажувальної здатності зубчастих передач дає можливість ввести до розгляду нові якісні чинники та удосконалити кількісні характеристики і критерії.

Таким чином, виникає нова масштабна актуальна і важлива науково-практична проблема. Її розв'язання пропонується досягати шляхом:

1. Впровадження нових видів зачеплення, наприклад, еволютного [1-5] або двопараметричного [6-10]. Це дозволить підвищити, в першу чергу, контактну міцність зубців, а також забезпечити розширені кінематичні можливості зубчастих механізмів.

2. Удосконалення теоретичних основ оцінки втомної згинної міцності, у т.ч. циліндричних зубчастих передач.

Пропонується також розробити фізичні та параметричні геометричні й числові моделі для аналізу циліндричних евольвентних та еволютних зубчастих передач за критеріями забезпечення заданого ресурсу; скласти рекомендації з науково обґрунтованого вибору конструктивних параметрів зубчастих передач за критеріями міцності та витривалості.

Постановка задач досліджень. Об'єкт дослідження – процес передачі навантаження в зубчастих зачепленнях та підвищення їх навантажувальної здатності. Предмет дослідження – методи синтезу геометрії і визначення на-

пружено-деформованого стану еволютних та традиційних зубчастих передач та оцінки втомної міцності. Загальна фундаментальна проблема, на вирішення якої спрямовано дослідження – розробка теоретичних основ синтезу нових зачеплень та забезпечення підвищеної навантажувальної здатності зубчастих передач шляхом удосконалення існуючих методів їх розрахунку.

Конкретна фундаментальна задача в рамках загальної проблеми, шляхи вирішення якої описані у статті, – удосконалення методів синтезу геометрії робочих поверхонь зубців нових видів зачеплення та удосконалення методів розрахунку втомної міцності зубчастих передач на основі сучасних досягнень механіки суцільного середовища.

Основна мета досліджень:

– розробка методів синтезу зубчастих передач із новими видами зачеплень, які мають підвищену навантажувальну здатність, а також таких, що забезпечують вищі якісні показники зачеплення, наприклад, еволютних;

– розробка теоретичних основ оцінки втомної згинної міцності циліндричних зубчастих передач шляхом математичного моделювання втомних процесів.

При цьому треба вирішити такі основні завдання:

1. Удосконалення методів синтезу спряжених поверхонь на прикладі еволютних та двопараметричних передач.

2. Розробка методів розрахунку геометрії еволютних зубців, побудова параметричних моделей зубчастих коліс.

3. Побудова параметричних та скінченно-елементних моделей зубчастих коліс.

4. Розробка методів оцінки контактної міцності еволютних та двопараметричних передач.

5. Моделювання процесу втомного руйнування зубця. Оцінка напружено-деформованого стану (НДС) зубця з тріщиною.

6. Розробка методів визначення допустимих напружень за результатами математичного моделювання.

7. Створення прикладних програмних модулів для автоматизованого аналізу контактної міцності та витривалості зубчастих передач.

8. Розв'язання тестових прикладних задач аналізу міцності та витривалості на прикладі реальних конструкцій циліндричних еволютних, евольвентних та двопараметричних зубчастих передач.

Аналіз стану досліджень. Зменшення габаритів зубчастих передач при одночасному збільшенні потужності, що передається, є актуальною проблемою сучасного машинобудування. Одним із шляхів у цьому напрямку є підвищення контактної міцності зубців. На цей час досягнуті великі успіхи у дослідженні традиційних евольвентних зубців. Але вони вже майже вичерпали резерви контактної міцності. Це стосується і матеріалів, що використовують для зубчастих коліс. Тому єдиний перспективний шлях у цьому напрямку –

впровадження нових видів зачеплень.

Як відомо, контактна міцність залежить від приведенного радіуса кривизни у полюсі. Для його підвищення необхідно застосовувати випукло-ввігнутий контакт. Цю задачу успішно вирішив М.Л. Новіков, тому передачі з його зачепленням широко впроваджуються у сучасному машинобудуванні. Але вони мають і деякі недоліки, наприклад, можуть бути тільки з косими зубцями. У наш час розроблено новий тип зачеплень, названий його автором, українським вченим А.І. Павловим, еволютним [1, 4]. Нині досить детально розглянута геометрія цих передач, якісні показники, проте оцінка їх навантажувальної здатності виконана лише орієнтовно. Тому вивчення контактної і згинної міцності зубців еволютних передач є актуальною і важливою науковою проблемою. Крім того, свого часу були запропоновані до розробки та двопараметричні передачі, які реалізують 2 види незалежних рухів – обертання та взаємне зміщення [6].

Другим шляхом в цьому напрямку є уточнення розрахунків на згинну міцність як традиційних евольвентних передач, так і еволютних [13-16]. У цьому випадку ми отримуємо максимальну енергонасиченість приводів, маємо можливість повністю реалізувати фізико-механічні властивості матеріалів, а також можливості існуючих та перспективних методів зміцнення зубців.

На цей час автори досягли значних успіхів у розв'язанні задачі визначення діючих напружень методом скінченних елементів (МСЕ) у просторовій постановці. Але при цьому використовують допустимі напруження, наведені у ГОСТ 21354-87. Як відомо, вони визначені за результатами натурних втомних випробувань зубчастих коліс для випадку плоскої задачі теорії пружності. Їх співставлення з діючими напруженнями, визначеними за допомогою МСЕ, призводить до парадоксального явища, а саме до зниження достовірності розрахунків. До того ж, навіть у випадку стандартних розрахунків, ці допустимі напруження достовірні лише для евольвентних циліндричних коліс зовнішнього зачеплення зі стандартним похідним контуром.

Таким чином, склалася ситуація, яка характеризується необхідністю розвитку теоретичних основ для удосконалення розрахунків зубчастих передач, з одного боку, та потенційно перспективних шляхів розв'язання цієї задачі, що запропоновані авторами, з іншого.

Методи, підходи, ідеї, робочі гіпотези, які пропонуються для вирішення завдань дослідження. Розв'язання проблеми, що склалася, пропонується на основі наступних ідей, підходів та гіпотез, що знайшли достатнє обґрунтування та перевірку у попередніх дослідженнях авторів.

1. Впровадження у сучасне машинобудування нових видів зубчастих зачеплень, в т.ч. еволютних зубчастих та двопараметричних передач. Для цього необхідно в першу чергу удосконалити *методи синтезу спряжених поверхонь* цих передач. На базі даних методів можлива розробка методів розрахунку геометрії зубців та побудова параметричних моделей. Далі пропонується ви-

значити основні геометричні та кінематичні показники, що впливають на контактну міцність (головні кривизни поверхонь, відносні швидкості ковзання та ін.) та побудувати скінченно-елементні моделі зубчастих коліс. На базі цього можлива розробка методики оцінки контактної міцності проєктованих передач. На першому етапі виконується оцінка контактних напружень за формулою Герца, а далі – дослідження контактної взаємодії зубців на базі МСЕ.

2. Перехід до *визначення допустимих напружень* при об'ємному НДС зубців аналітично, *шляхом математичного моделювання втомних руйнувань*. Останні досягнення в галузі матеріалознавства дозволяють моделювати процес втомного руйнування твердого тіла. З іншого боку, сучасні програмні комплекси для визначення НДС дозволяють проводити розрахунок моделі зубця з тріщиною. Об'єднання цих двох тез у вигляді математичної моделі розвитку втомного руйнування і є основною ідеєю. А саме: задається геометрія зуба, спектр навантажень, фізико-механічні та структурні характеристики матеріалу. Моделюється процес зародження та розвитку втомної тріщини шляхом визначення критичних мікронапружень в матеріалі. Зростання тріщини викликає зміну НДС зубця, а це, в свою чергу, визиває подальший ріст втомного руйнування. Таким чином, проводячи математичне моделювання процесу, можна визначити допустимі втомні напруження.

3. Поеднання запропонованих методів та моделей на основі узагальненого параметричного опису [17], що забезпечить розв'язання багатокритеріальних задач синтезу зачеплень.

Напрямки досліджень. Як результат дослідження отримуються нові знання про основні властивості геометрії нових видів зачеплень та про характеристики міцності зубчастих коліс при багатоцикловому навантаженні. У результаті розробляється загальна концепція та методи забезпечення підвищеної навантажувальної здатності нових та традиційних зубчастих передач. Зокрема, пропонується:

- розробка удосконалених методів синтезу робочих поверхонь зубців нових передач;
- розробку методів та моделей аналізу якісних показників нових видів зачеплення;
- удосконалення методів і моделей для розрахунків на контактну міцність зубчастих передач;
- удосконалення теоретичних основ моделювання втомних процесів на основі останніх досягнень фізики металів та теоретичних основ міцності;
- розробка методології визначення допустимих напружень за результатами математичного моделювання;
- створення єдиної параметричної моделі для подальшої реалізації запропонованих розробок у вигляді програмних комплексів для автоматизованого аналізу контактної міцності та витривалості зубчастих передач/

Очікувані результати розробок відповідають сучасному світовому рівню.

Наприклад, у загальновідомому пакеті MSC.Fatigue присутні модулі аналізу росту втомної тріщини, але досі відсутні модулі втомних розрахунків зубчастих коліс та інших складнопрофільних деталей (є тільки модуль оцінки витривалості простих тіл обертання). Самі нові зубчасті передачі є малодослідженим видом передач, новим є також метод єдиного параметричного опису складних та надскладних механічних систем, запропонований авторами до досліджень зубчастих зацеплень. Кожний із запропонованих підходів є новим, відповідає світовому рівню, а в сукупності вони забезпечують нові якісні результати, що також будуть відповідати світовому рівню.

Для **організаційного забезпечення досліджень** в НТУ "ХПІ" створено науково-дослідний та навчальний центр комп'ютерного моделювання машинобудівних конструкцій, у якому зібрано колектив досвідчених вчених та талановитої молоді. Він оснащений найсучаснішими програмно-апаратними засобами, в т.ч. комп'ютерним кластером для проведення числового моделювання напружено-деформованого стану складних об'єктів, та має значний доробок за тематикою досліджень і досвід успішного виконання масштабних науково-дослідних проєктів.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" проводить великий обсяг науково-освітньої діяльності з підготовки фахівців у галузі проєктування, технологічної підготовки та дослідження машинобудівних конструкцій. При цьому велика увага приділяється інтеграції наукових досліджень і навчального процесу та проєктів із промисловими підприємствами України.

Слід зазначити, що останнім часом значну гостроту в Україні набула проблема розробки та дослідження механічного приводу, в тому числі прогресивних видів зубчастого зацеплення. З цього напрямку НТУ "ХПІ" має значні досягнення за фундаментальними бюджетними темами, господарчими договорами, грантами та договорами про співробітництво. Розроблені теоретичні основи розрахунків зубчастих передач. Підготовлені кілька докторських та кандидатських дисертацій. Діє спеціалізована вчена рада за спеціальністю 05.02.02 "Машинознавство". Навчаються аспіранти та докторанти. Випускається фахове видання "Вісник НТУ "ХПІ". Машинознавство і САПР" та "Вісник НТУ "ХПІ". Проблеми механічного приводу". Проводиться щорічна міжнародна конференція "Проблеми якості і довговічності зубчастих передач, редукторів, їх деталей і вузлів".

Враховуючи вказані обставини, на сумісному семінарі Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", "Інституту машин і систем" МПП та НАН України, НДІ Редуктор, а також інших організацій, та беручи до ваги рішення конференції "Проблеми якості і довговічності зубчастих передач, редукторів, їх деталей і вузлів", було прийнято пропозиція про діяльність, актуальність та важливість організації в НТУ "ХПІ" міжгалузевої проблемної лабораторії "Розробка та дослідження прогресивних ви-

дів зубчастого зацеплення та механічного приводу".

Таким чином, як основний **висновок** можна відзначити, що в НТУ "ХПІ" склалися всі об'єктивні обставини та чинники для розвитку досліджень в області синтезу геометрії та забезпечення підвищеної навантажувальної здатності нових зубчастих зацеплень.

Список літератури: 1. Павлов А.И. Современная теория зубчатых зацеплений. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – 100с. 2. Кириченко А.Ф., Павлов А.И. Зависимость между параметрами зацепления в эволютной передаче // Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків, 2006. – №22. – С.24–28. 3. Носко П.Л., Павлов А.И., Черников А.В. Построение сопряженной поверхности зубчатого зацепления // Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків, 2008. – №29. – С.29–32. 4. Павлов А.И. Синтез высоконавантажених передач на основі лінійчастих зубчастих зацеплень з опукло-увігнутим контактом робочих поверхонь: Автореф. дис... докт. техн. наук.: 05.02.02. – Луганськ, 2009. – 42с. 5. Протасов Р.В., Устиненко А.В. Аналитическое описание поверхностей зубьев эволютных передач // Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Тематичний випуск "Машинознавство та САПР". – Харків, 2009. – №12. – С.14–18. 6. Устиненко А.В. Разработка двухпараметрических зубчатых передач и исследование их геометрии и контактной прочности: Дисс... канд. техн. наук. 05.02.02. – Харьков, 2000. – 186с. 7. Устиненко А.В. Алгоритм поиска технических решений в процессе разработки конструкций двухпараметрических зубчатых передач // Вестник ХГПУ: Сб. научн. трудов. Вып.109. – Харьков, 2000. – С.60–64. 8. Волонцевич Д.О. Казанжиева Т.В. Устиненко А.В. Разработка приводов машин на базе двухпараметрических зубчатых передач // Вестник НТУ "ХПІ": Сб. научн. трудов. Тем. вып. "Технологии в машиностроении". – Харьков, 2002. – №10. – Т.3. – С.73–78. 9. Ткачук Н.А., Ткачук Н.Н., Полищук Т.В. Контактное взаимодействие элементов конструкций с кинематически генерируемыми поверхностями // Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Тематичний випуск "Транспортне машинобудування". – Харків, 2007. – №33. – С.176–183. 10. Ткачук Н.Н., Ткачук Н.А. Программный комплекс синтеза геометрии и анализа напряженно-деформированного состояния звеньев двухпараметрических передач // Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків, 2007. – №21. – С.68–76. 11. Кавецкий С.Н., Гереш Т.В. Геометрический расчет зубчатых колес планетарного механизма II с малой разностью чисел зубьев первой и второй ступеней // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ, 2007. – №9(115). Ч.1. – С.79–83. 12. Бондаренко О.В. Устиненко О.В. Критерії та шляхи оптимізації тривалих коробок передач // Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Тематичний випуск "Машинознавство та САПР". – Харків, 2009. – №12. – С.14–18. 13. Кириченко А.Ф., Устиненко А.В., Танасевский В.В. Совершенствование стандартных прочностных расчетов зубчатых передач на основе моделирования усталостных процессов // Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків, 2006. – №22. – С.110–114. 14. Ткачук Н.А. и др. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57–79. 15. Приймаков А.Г., Устиненко А.В., Приймаков Г.А. Аналитическое определение трещиностойкости зубчатых пар с позиций синергетики // Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків, 2007. – №21. – С.76–86. 16. Кириченко А.Ф., Устиненко А.В. Определение выносливости зубьев на изгиб путем моделирования усталостных процессов // XXIII Symposion Podstaw Konstrukcji Maszyn. – Rzeszow-Przemysl, 2007. – Т.4. – С.321–327. 17. Чепурной А.Д., Полищук Т.В., Ткачук Н.А., Ткачук Н.Н. Проблемы моделирования сложных механических систем с применением CAD/CAM/CAE-технологий // Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків, 2008. – №28. – С.88–98.

Надійшла до редакції 21.04.10